Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 37, 3, 2025. (27-42)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Study of the Effect of Thermo-Physics Parameters in Nano Fluid Non-Newtonian in the Heat Exchanger with Vertical Helical Coils

Research Article

Habib Karimi[1], Kourosh Javaherdeh[2]

10.22067/jacsm.2024.86865.1242

Abstract-- **This study numerically investigated laminar mixed convection heat transfer of a non-Newtonian nanofluid flow in helical coil heat exchangers. The volumetric concentration of nanoparticles ranged from 0% to 2%, and the power-law indices considered for the non-Newtonian fluid were 0.81, 0.85, and 0.91. The momentum and energy equations were solved using the finite volume method and the SIMPLE algorithm. The effects of the power-law index, Richardson number, coil pitch, and nanoparticle volumetric concentration on the Nusselt number were examined. The results indicated that the heat transfer coefficient increased with a rise in the volumetric concentration of nanoparticles from 0% to 2%. Furthermore, the Nusselt number increased with a decrease in the power-law index. The heat transfer coefficient was also enhanced by increasing the coil pitch and the nanoparticle concentration. Specifically, the Nusselt number increased by 7% when the coil pitch was varied from 0.05 to 0.1. Buoyancy forces significantly affected the patterns of temperature distribution and flow velocity within the helical coils. The temperature distribution became more uniform with increasing buoyancy forces.**

***Keywords*: Nano Fluids, Non-Newtonian, Heat Exchangers Helical Coils, Mix Convection, Numerical Study**

1- Introduction

Heat exchanger is one of the most equipment for heat transfer in various industrials. Using vertical helical coil is one of the method for increasing heat transfer. In vertical helical coil, the radial component of the velocity is created by the centrifugal force, and the fluid flow in the outer part of the tube moves faster than the inner part, and this speed difference creates a secondary flow [1]. By using helical tubes instead of straight tubes, curved flow lines are replaced by straight flow lines and increased the heat transfer. This study investigated mixed convection heat transfer laminar flow Non Newtonian in heat exchangers helical coils with Nanofluids[2]. Volumetric concentration of nanoparticles are with 0 to 2% and power law indexes are 0.81, 0.85 and 0.91 in this Non-Newtonian flow.

2-Geometry and equations

In this research, studied heat transfer on three dimension channel with vertical helical coil. Inner Diameter of coil is 2r, pitch coil is H and ratio of diameter tube to diameter coil is δ. Figure 1 showed geometry of vertical helical coil. Table 1 showed geometric specifications of vertical helical coil in heat exchanger. Table 2 showed rheological properties water- CMC with various mass percentage.

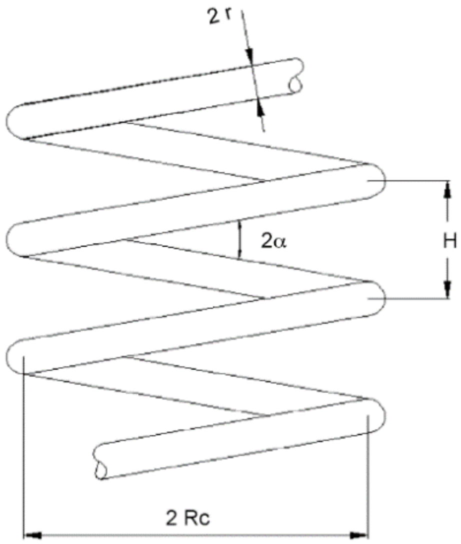


Fig. 1. Vertical helical coil in heat exchanger

Table 1. Geometric specifications of vertical helical coil

helical coil	δ	L (mm)	2r (mm)	2Rc (mm)	N	H (mm)
Coil 1	0.1	2830.56	20	200	4.5	30
Coil 2	0.08	3536.86	20	250	4.5	30
Coil 3	0.066	4243.29	20	300	4.5	30
Coil 4	0.05	5656.47	20	400	4.5	30

* Manuscript received February 16, 2024, Revised August 20, 2024, Accepted October 26, 2024.

[1] Assistant Professor, Department of mechanical engineering, Roudsar and Amlash branch, Islamic Azad University, Roudsar, Iran.

2 Corresponding Author: Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran,
Email: javaherdeh@guilan.ac.ir

Table 2. Rheological properties [3]

Rheology property	Water CMC (0.3%)	Water-CMC (0.2%)	Water-CMC (0.1%)	Water-CMC (0%)
n	0.81	0.85	0.91	1
K'	0.003136	0.01754	0.006319	0.000855

Nano fluid is single phase. Nano particles have same geometry and dimension and they are in equilibrium thermodynamic. Continuity, momentum and energy equations follow[4]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i u_j\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial\left(\rho C_P u_i T\right)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \quad (3)$$

Dimensionless numbers of Din, Prandtl and Reynolds for Non-Newtonian fluids are given in below equations:

$$Re_{gen} = \frac{d^n u^{2-n} \rho}{k' 8^{n-1}} \quad (4)$$

$$Dn' = Re_{gen}\sqrt{\delta} \quad (5)$$

$$\mathrm{Pr}' = \frac{Cp}{K} K'(\frac{8u}{di})^{n-1} \quad (6)$$

Effective density ρ_{nf}, effective dynamic viscosity μ_{nf}, thermal capacity $(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{nf}}$ and effective thermal conductivity k_{nf} are follow :

$$\mu_{\mathrm{nf}} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (7)$$

$$\rho_{\mathrm{nf}} = (1-\varphi)\rho_{\mathrm{f}} + \varphi\rho_{\mathrm{s}} \quad (8)$$

$$(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{nf}} = (1-\varphi)(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{f}} + \varphi(\rho c_{\mathrm{p}})_{\mathrm{s}} \quad (9)$$

$$\frac{k_{\mathrm{nf}}}{k_{\mathrm{f}}} = \frac{k_{\mathrm{s}} + 2k_{\mathrm{f}} - 2\varphi(k_{\mathrm{f}} - k_{\mathrm{s}})}{k_{\mathrm{s}} + 2k_{\mathrm{f}} + \varphi(k_{\mathrm{f}} - k_{\mathrm{s}})} \quad (10)$$

For simulations, used k-ε Realizable turbulence model. Also, used Simple algorithm for solving Continuity, momentum and energy equations together. Figure 2 showed mesh of vertical helical coil.

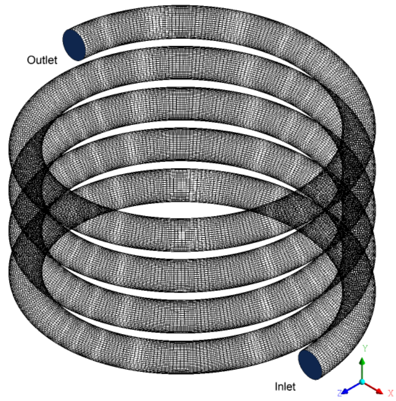
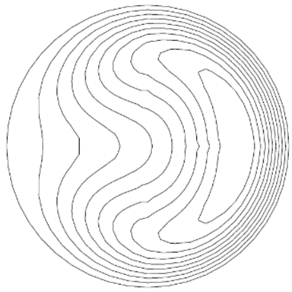
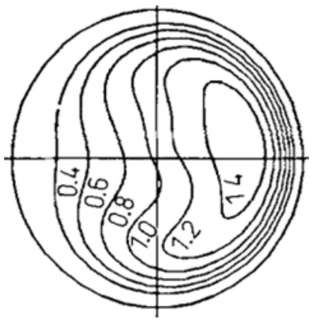


Fig. 2. Mesh of vertical helical coil

For validation, results compared with others on temperature distribution for mix convection Newtonian fluid with buoyancy forces in figure 3.



(**a**)



(**b**)

Fig. 3. Temperature distribution (a) present work (b) others [5] in Newtonian fluids with (Pr=1, Gr=0, Ri=0)

3-Results

In this research, have been investigated mixed convection heat transfer laminar flow Non Newtonian in heat exchangers helical coils with Nanofluids. Results showed that the heat transfer coefficient was increased by increasing volumetric concentration of nanoparticles from 0 to 2%. Figure 4 showed effect of adding nano particles of aluminum dioxide to Nusselt number in Non-Newtonian nanofluid. With increasing percentage of nano particle in base flow, conductive coefficient and heat transfer coefficient are increased. For example, for Ri=4 and ϕ=2%, Nusselt number increased up to 9%.

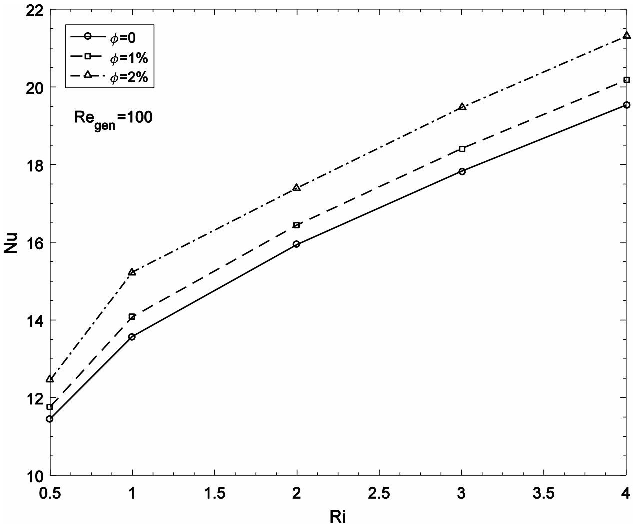


Fig. 4. Nusselt number for various nano particles

With increasing pitch led to increase in the angle of between tubes and Centrifugal force in central of fluid. Centrifugal force is more than buoyancy forces in smaller Richardson number. But with increasing Richardson number, effect of pitch coil increased on heat transfer. Reducing power law index led to increase heat transfer coefficient in the presence of buoyancy forces. In constant Reynolds number, increasing Richardson number led to increase Grashof and buoyancy forces. With increasing Richardson number, role of Grashof number is more than forced convection heat transfer. In this case, viscosity is reduced and molecular collision and Nusselt number are increased. Figure 5 showed Nusselt number and Richardson number. Heat transfer in vertical helical coil is increased with increasing Prandtl and Richardson number. Also, in smaller Prandtl numbers, the role of apparent viscosity is greater against thermal diffusion coefficient.

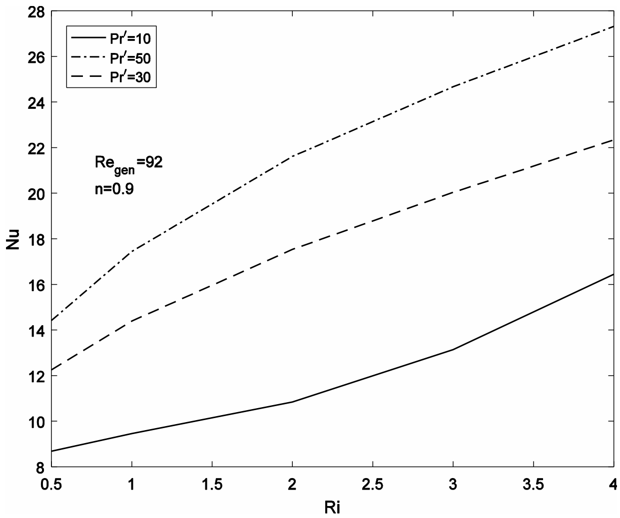


Fig. 5. Nusselt number for various Richardson number

5-Conclusion

This research investigated a mixed convection heat transfer based on Non-Newtonian with Nano fluids in three dimension for helical coils. Increasing volumetric fraction of Nanoparticles led to increase heat transfer and Nusselt number and friction coefficient. Heat transfer is increased with increasing Reynolds number. The intensity and pattern of secondary currents are affected by buoyancy and centrifugal forces, then, the heat transfer rate is increased in helical coils compared to straight coils. By increasing Richardson number, average Nusselt number and friction coefficient reduced.

With the increasing of buoyancy forces and Prandtl number in mix convection, the heat transfer coefficient increased noticeably, because solid particles can be play a more effective role in heat transfer in mix convection. At the same Reynolds number and Richardson number, decreasing the power index increases the heat transfer.

References

[1].M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, and D. D. Ganji, “Experimental study on turbulent flow and heat transfer in an air to water heat exchanger using perforated circular-ring,” Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 70, pp. 185–195, 2016. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.09.013

[2].K. Javaherdeh and H. Karimi, “Numerical analysis of the obstacle effect with different geometry on the heat transfer of nanofluid flow in a rectangular channel,” Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 35, no. 3, pp. 51–64, 2023.

[3]. K. Javaherdeh and H. Karimi, “Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al_2O_3 nanoparticle in a channel with block,” Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 32, no. 1, pp. 93–110, 2023. https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.40042

[4]. E. Taheran and K. Javaherdeh, “Experimental investigation on the effect of inlet swirl generator on heat transfer and pressure drop of non-Newtonian nanofluid,” Applied Thermal Engineering, vol. 147, pp. 551–561, 2019. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.034

[5]. G. Yang and M. Ebadian, “Mixed convective flow and heat transfer in a vertical helicoidal pipe with finite pitch,” Computational Mechanics, vol. 14, pp. 503–512, 1994. https://doi.org/10.1007/BF00377602

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تأثیر پارامترهای ترموفیزیکی بر انتقال حرارت جریان نانوسیال غیرنیوتنی در مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ قائم*

مقاله پژوهشی

حبیب کریمی [(۱)] کورش جواهرده [(۲)]

DOI: 10.22067/jacsm.2024.86865.1242

چکیده *در مطالعه حاضر به بررسی افزایش انتقال حرارت ترکیبی نانو سیال در سیال غیرنیوتنی در مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ قائم پرداخته می‌شود. نسبت‌های انحنای مختلف برای لوله‌های مارپیچ قائم و غلظت حجمی نانوذرات با نسبت‌های ۰ تا ۲٪ در نظر گرفته شده است. همچنین شاخص توانی سیال غیرنیوتنی ۰/۸۱، ۰/۸۵ و ۰/۹۱ انتخاب و از روش عددی حجم محدود و الگوریتم سیمپل برای ارتباط بین معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده شده است. تأثیر شاخص توانی، عدد ریچاردسون، گام در لوله مارپیچ قائم و غلظت حجمی نانوذره اکسید آلومینیوم بر روی عدد ناسلت بر روی دیواره برای چهار کویل با نسبت انحنای متفاوت نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش غلظت حجمی نانوذره اکسید آلومینیوم از صفر تا ۲٪ باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک می‌گردد. همچنین کاهش شاخص توانی سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک سبب افزایش عدد ناسلت و کاهش ضریب اصطکاک گشته و افزایش گام کویل و غلظت حجمی نانوذره سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. به طوریکه با تغییر گام بی‌بعد کویل از ۰/۰۵ به ۰/۱، عدد ناسلت میانگین ۷٪ افزایش پیدا نمود. نیروی شناوری بر الگوی توزیع دما و سرعت جریان در لوله‌های مارپیچ تأثیر گذاشته و با افزایش آن، الگوی توزیع دما و سرعت جریان یکنواخت‌تر می‌گردد.*

واژه‌های کلیدی نانوسیال، سیال غیرنیوتنی، لوله مارپیچ قائم، جابه‌جایی ترکیبی، تحلیل عددی

مقدمه

مبدل‌های حرارتی یکی از مؤثرترین ابزار انتقال حرارت در صنایع مختلف بوده و در میان انواع مختلف مبدل‌های حرارتی، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین مبدل حرارتی موجود بوده که بیشتر از مبدل‌های حرارتی دیگر در صنایع مختلف استفاده می‌شود [1]. استفاده از لوله‌های مارپیچ به عنوان یکی از راهکارهای افزایش مبادله حرارت در این نوع مبدل‌ها بکار می‌رود. در لوله‌های مارپیچ، مؤلفه شعاعی سرعت توسط نیروی گریز از مرکز ایجاد شده و جریان سیال در قسمت بیرونی لوله سریعتر از قسمت درونی آن حرکت کرده و این اختلاف سرعت، جریان ثانویه‌ای را به وجود می‌آورد. با استفاده از لوله‌های مارپیچ به جای لوله‌های مستقیم خطوط جریان خمیده جایگزین خطوط جریان مستقیم شده و سبب افزایش نرخ مومنتوم و انتقال حرارت می‌شوند، در نتیجه اندازه مبدل حرارتی کوچکتر شده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد [2]. یکی از روش‌های افزایش هدایت حرارتی سیال، اضافه کردن ذرات کوچک جامد به سیال است. استفاده از نانوذرات یک روش مؤثر برای بهبود شاخص‌های انتقال حرارت سیال است [3]. استفاده از سیالات غیرنیوتنی با توجه به شدت برش، ویسکوزیته سیال نیز تغییر می‌یابد [4]. کریمی و همکاران به بهینه سازی هزینه کلی سالیانه در مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداخته‌اند [7-5]. قنبری و همکاران [8] به بررسی انتقال حرارت

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۱/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۵ می باشد.

(۱) استادیار، گروه مکانیک، واحد رودسر و املش، دانشگاه آزاد اسلامی، رودسر، ایران.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: Javaherdeh@guilan.ac.ir

و افت فشار در نانوسیال غیرنیوتنی محیط متخلخل پرداخته و نشان دادند که افزایش ۲٪ وزن نانوذرات باعث افزایش ۱۲٪ هدایت حرارتی و ۴۰٪ ضریب انتقال حرارت متوسط می‌شود. مظفری و همکاران [9] به بررسی انتقال حرارت در یک جریان نانوسیال غیرنیوتنی بر روی یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با پره-های حلزونی پرداختند. طاهران و همکاران [10] به بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار بر روی یک ژنراتور چرخشی با استفاده از جریان نانوسیال غیرنیوتنی پرداخته و در نانوذرات و عدد رینولدز مختلف، رفتار جریان را بررسی نمودند. نعمتی و همکاران [11] به بررسی تغییر موقعیت منبع حرارتی بر انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی درون کانال موج‌دار با دامنه و تعداد نوسان متغیر پرداخته و نشان دادند که در یک موقعیت مشخص قرارگیری دیواره گرم، با افزایش سایر پارامترها، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی‌ست که دیواره گرم به ورودی کانال نزدیک‌تر است. جواهرده و همکاران [12] به بررسی جابه‌جایی ترکیبی جریان نانوسیال غیرنیوتنی در یک کانال حاوی موانع پرداخته و نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، میزان انتقال حرارت در کانال افزایش می‌یابد. حسینی راد و همکاران [13] به بررسی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای موجدار با استفاده از روش تاگوچی پرداخته و با استفاده از روش آنالیز واریانس، مقدار بهینه هر یک از مشخصات هندسی و همچنین تأثیر آنها بر میزان انتقال حرارت، افت فشار هوا و نشان دادند که دامنه‌ی موج مؤثرترین مشخصه‌ی هندسی بر معیار ارزیابی عملکرد مؤثر است. پاکدامن و همکاران [14] به بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی صفحه‌ای پرداخته و تأثیر زاویه شورون و عدد رینولدز را بر روی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفت. اسکندری و همکاران [15] به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به وسیله الگوریتم ژنتیک پرداخته و نشان دادند که جریان‌های جت ایجاد شده باعث افزایش انتقال حرارت شده و محصولات خوردگی و رسوبات شیمیایی دسته لوله‌ها را کاهش می‌دهد. کاهانی و همکاران [16] به بررسی تأثیر نسبت انحنا و گام کویل در مبدل حرارتی برای نانوسیال اکسید الومینیوم پرداختند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که درصد انتقال حرارت و افت فشار با افزایش درصد حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. رخشا و همکاران [17] با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال اکسید مس /آب در لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اضطکاک ارائه دادند. همچنین پاورا و همکاران [19] به مطالعه تجربی بر روی سیالات غیرنیوتنی در کویل‌های عمودی پرداخته و رابطه‌ای برای به‌دست آوردن ضریب اصطکاک ارائه دادند.

تا کنون مطالعاتی در زمینه انتفال حرارت و افت فشار در جابه‌جای ترکیبی نانوسیالات با سیال پایه غیرنیوتنی در کویل‌های مارپیچ قائم انجام نشده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی شاخص‌های انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال‌های غیرنیوتنی با غلظت حجمی مختلف نانوذرات و نسبت انحناهای مختلف کویل تحت شرایط انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های مارپیچ است. همچنین، استفاده از سیال غیرنیوتنی به عنوان سیال پایه و بررسی تأثیر خواص رئولوژیکی سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک بر انتقال حرارت و افت فشار جریان در مبدل‌های حرارتی با کویل مارپیچ قائم از دیگر موارد بررسی شده در این پژوهش می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده چهار مورد نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات محققین دیگر را می‌توان به صورت ذیل مورد اشاره قرار داد:

۱. بررسی جریان انتقال حرارت ترکیبی (آزاد و اجباری) در یک لوله مارپیچ قائم
۲. استفاده از سیال پایه غیرنیوتنی
۳. استفاده از نانوذرات جامد در سیال پایه غیرنیوتنی با غلظت‌های حجمی متفاوت
۴. استفاده از لوله‌های مارپیچ متفاوت با تعداد و شکل انحنای مختلف

معادلات حاکم

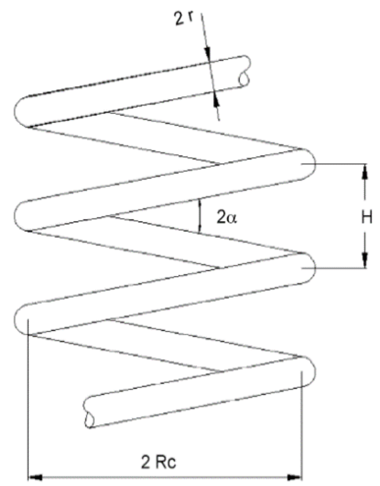
در شکل (۱) طرحی از یک کویل مارپیچ نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱)، شماتیک مسئله کویل مارپیچ را در سه بعد نشان داده و لوله دارای قطر داخلی 2r و کویل دارای قطر 2Rc می‌باشد. فاصله بین دو مجاور گام کویل نامیده شده که با H

نمایش داده می‌شود. نسبت قطر لوله به قطر کویل نسبت انحنا نامیده و با δ نشان داده می‌شود.

$$\delta = \frac{r}{Rc} \quad (۱)$$

نسبت گام کویل به طول یک دور از کویل، گام بی‌بعد نامیده می‌شود و با λ نمایش داده می‌شود:

$$\lambda = \frac{H}{۲\pi Rc} \quad (۲)$$

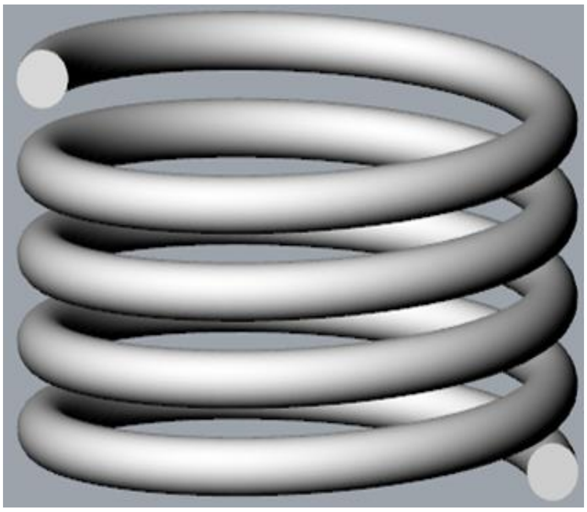


شکل ۱ شماتیک لوله مارپیچ در مبدل حرارتی

به زاویه تصویر یک دور از کویل با صفحه عمود بر محور کویل زاویه مارپیچ گفته و با θ نمایش داده می‌شود. تعداد دور-های یک کویل مارپیچ نیز با N مشخص می‌گردد. در این مطالعه از چهار نوع هندسه لوله مارپیچ با نسبت انحناهای مختلف بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ استفاده شده که مشخصات هندسی آن در جدول (۱) امده است. شکل (۲) مدل ساخته شده یک کویل مارپیچ را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات هندسی کویل‌های مارپیچ مورد استفاده [20]

کویل مارپیچ	δ	L (mm)	2r (mm)	2Rc (mm)	N	H (mm)
کویل ۱	۰/۱	۲۸۳۰/۵۶	۲۰	۲۰۰	۴/۵	۳۰
کویل ۲	۰/۰۸	۳۵۳۶/۸۶	۲۰	۲۵۰	۴/۵	۳۰
کویل ۳	۰/۰۶۶۶	۴۲۴۳/۲۹	۲۰	۳۰۰	۴/۵	۳۰
کویل ۴	۰/۰۵	۵۶۵۶/۴۷	۲۰	۴۰۰	۴/۵	۳۰



شکل ۲ مدل یک کویل مارپیچ (کویل ۱)

روابط (۳) تا (۶) مدل‌سازی ویژگی‌های وابسته به دمای آب از توابع چند جمله‌ای به‌دست آمده در پژوهش شیخ الاسلامی و همکاران [21] را نشان می‌دهد.

$$\rho(T) = -5.03192e^{-8}T^4 + 7.71017e^{-5}T^3 - 0.046535T^2 + 12.2563T - 166.221 \quad (۳)$$

$$C_P(T) = 6.055427e^{(-7)}T^4 - 0.00080339T^3 + 0.407242T^2 - 92.96175T + 12201.77 \quad (۴)$$

$$K(T) = 6.7722e^{(-11)}T^4 - 9.5665e^{(-8)}T^3 + 4.05309e^{(-5)}T^2 - 0.004061T + 0.21117 \quad (۵)$$

$$\mu(T) = 3.2451e^{-11}T^4 - 4.4517e^{-8}T^3 + 2.2937e^{-5}T^2 - 5.2627e^{-3}T + 0.45563 \quad (۶)$$

برای مدلسازی سیال غیرنیوتنی از محلول CMC- آب با درصد جرمی ۰/۱ تا ۰/۳ به عنوان سیال پایه غیرنیوتنی با رفتار رئولوژیکی شبه پلاستیک که ویژگی آنها در جدول (۲) آمده، استفاده شده است. لذا ویسکوزیته سیال را می‌توان از مدل مدل توانی به‌دست آورد [22,23]:

$$\eta' = K'\gamma^{n-۱} \quad (۷)$$

جدول ۲ خواص رئولوژیکی محلول CMC– آب با درصد جرمی ۰ تا ۰/۳ درصد [22]

خواص رئولوژیکی	CMC (٪۰)–آب	CMC (٪۰/۱)–آب	CMC (٪۰/۲)–آب	CMC (٪۰/۳)–آب
شاخص مدل توانی (n)	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۸۱
شاخص پایداری (K′)	۰/۰۰۰۸۵۵	۰/۰۰۶۳۱۹	۰/۰۱۷۵۴۰	۰/۰۳۱۳۶۰۳

چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر به‌دست می‌آید [25]:

$$\rho_{nf} = (1-\emptyset)\rho_f + \emptyset\rho_{np} \tag{۸}$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\emptyset)(\rho C_p)_f + \emptyset(\rho C_p)_{np} \tag{۹}$$

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_{np}+2K_f) - 2\emptyset(K_f - K_{np})}{(K_{np}+2K_f) + \emptyset(K_f - K_{np})} \tag{۱۰}$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\emptyset)^{2.5}} \tag{۱۱}$$

جدول (۳) خواص ترموفیزیکی نانوذره AL_2O_3 نشان داده می‌شود.

جدول ۳ خواص ترمو–فیزیکی نانوذرات Al_2O_3 [25]

قطر ذرات (nm)	ρ (Kg/m3)	Cp (J/Kg K)	K (W/mK)	β (1/K)
۴۰	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	$۰/۸۵\times۱۰^{-۵}$

عدد رینولدز در جریان سیالات غیرنیوتنی از عدد رینولدز تعمیم یافته استفاده می‌شود:

$$Re_{gen} = \frac{d^n u^{2-n}\rho}{k' 8^{n-1}} \tag{۱۲}$$

اعداد دین و پرانتل تعمیم یافته برای سیال غیرنیوتنی از روابط زیر به‌دست می‌آید [25]:

$$Dn' = Re_{gen}\sqrt{\delta} \tag{۱۳}$$

$$Pr' = \frac{Cp}{K} K' \left(\frac{8u}{di}\right)^{n-1} \tag{۱۴}$$

عدد رینولدز بحرانی در لوله‌های مارپیچ در مرجع [18] ارائه شد که برای تعیین رژیم جریان استفاده شده است:

$$Re_{cr} = 2300[1 + 8.6\delta^{0.45}] \tag{۱۵}$$

عدد بی‌بعد M برای تعیین تغییر رژیم جریان از آرام به مغشوش معرفی می‌شود:

$$M = Re_{gen}^{1-\emptyset(n)}/\psi(n)\delta^{\frac{\square(n)}{2}} \tag{۱۶}$$

در این رابطه φ(n) و ψ(n) توابعی بر حسب شاخص مدل توانی سیال (n) می‌باشند. مقادیر عدد M برای سیال‌های مورد استفاده در جدول (۴) محاسبه شده است. در جریان آرام جابه‌جایی ترکیبی برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در حالت پایدار سه بعدی روابط زیر برقرار است:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{۱۷}$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) - \rho g_i \beta(T - T_0) \tag{۱۸}$$

که در آن T_0 دما در ورودی کویل است. معادله انرژی از رابطه (۱۹) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho C_P u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \tag{۱۹}$$

جدول ۴ مقدار عدد M برای سیال‌های مورد استفاده [18]

سیال	عدد M
آب	$\frac{Re^{0.64}}{0.26\delta^{0.18}}$
CMC (٪۰/۱)–آب	$\frac{Re_{gen}^{0.73}}{0.354\delta^{0.135}}$
CMC (٪۰/۲)–آب	$\frac{Re_{gen}^{0.78}}{0.427\delta^{0.11}}$
CMC (٪۰/۳)–آب	$\frac{Re_{gen}^{0.82}}{0.511\delta^{0.09}}$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در یک سطح مقطع لوله:

$$h_m = \frac{q''_m}{T_{w,m} - T_b} \tag{۲۰}$$

و عدد ناسلت میانگین در یک سطح مقطع لوله:

$$Nu_m = \frac{h_m d}{K_m} \tag{۲۱}$$

و شار حرارتی در یک سطح لوله از رابطه زیر به‌دست می‌آیند:

$$\omega_m = \frac{\int_0^{2\pi} (\omega \Delta A) d\omega}{\int_0^{2\pi} (\omega A) d\omega} \tag{۲۲}$$

در رابطه اخیر ω می‌تواند هر یک از پارمترهای K، T و q باشد. همچنین ΔA، مساحت المان یک حلقه موازی دیواره است که پارامترهای فوق مربوط به این ناحیه می‌باشند [11]. در انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی مقادیر عدد رایلی، گراشف و ریچاردسون طبق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\alpha v} \quad , \quad Gr = \frac{Ra}{Pr} \quad , \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2} \tag{۲۳}$$

برای سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک رابطه عدد رایلی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T d^{2n+1}}{\frac{\alpha^n K'}{\rho}} \tag{۲۳}$$

ضریب اصطکاک دارسی برای جریان داخلی نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$f = \frac{2\Delta P d}{\rho u^2 L} \tag{۲۳}$$

حل عددی

برای شبیه سازی جریان سیال از مدل آشفتگی سه بعدی k-ε Realizable استفاده شده که این مدل دو تفاوت عمده با مدل k-ε استاندارد دارد. این مدل بر خلاف مدل استاندارد، از مقادیر متغیر برای کمیت C_μ استفاده می‌کند. در جریان‌های تحت کرنش بالا، رینولدز نرمال در روابط k-ε منفی شده که از نظر فیزیکی معنا ندارد. مقدار متغیر C_μ تابعی از نرخ کرنش محلی و چرخش جریان بوده و برای جلوگیری از مقادیر غیرفیزیکی تنش رینولدز نرمال طراحی شده است. دومین تفاوت این روش، پیش بینی جریان‌های چرخش، جریان‌های ثانویه پیچیده، لایه مرزی تحت گرادیان فشار معکوس شدید بوده که جدایش و انحنای شدید خطوط جریان را دقیقتر می‌کند. برای حل همزمان معادلات پیوستگی و مومنتوم از الگوریتم Simple استفاده شده است. معیار همگرایی نسبی برای پیوستگی سرعت‌ها 10^{-5}، برای معادله انرژی 10^{-6} و برای k و ε ، 10^{-4} در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی تحلیل جابه‌جایی ترکیبی آرام در جدول (۵) آورده شده است:

جدول ۵ شرایط مرزی تحلیل‌های جابه‌جایی ترکیبی

متغیر	ورودی	خروجی	دیواره
u	۰/۰–۰۱/۱ m/s	$\frac{\partial u}{\partial n} = 0$	۰
T	۲۹۰ K	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	۳۸۰–۲۹۰ K
P	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	۰	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$

شبکه‌بندیکویل مارپیچ و سطح مقطع آن در شکل (۳) نشان داده شده است. برای اطمینان از دقت و اعتبار نتایج از چگالی شبکه بر واحد حجم استفاده شده است. مطابق شکل (۴)، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش چگالی شبکه تغییر محسوسی نکرده و همین چگالی برای محاسبات انتخاب می‌شود. در مدل سازی زیر لایه لزج نیز از تابع دیواره مقیاس پذیر استفاده شده است.

در این پژوهش، برای مدل‌سازی زیر لایه لزج، از توابع دیواره قیاس پذیر استفاده شده است. برای استفاده از این توابع می‌بایست اولین گره نزدیک دیواره خارج از زیر لایه لزج باشد ($y^+ > 11.2$). مظفری و همکاران [9] پیشنهاد دادند که از گره با $y^+ < 30$ جلوگیری شود. برای محاسبه y^+ از روابط (۲۴) استفاده می‌شود.

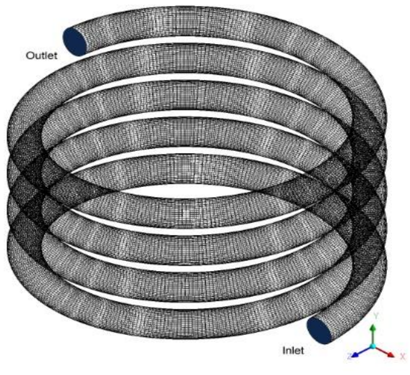
$$y^+ = \frac{y u_\tau}{v} \tag{۲۴}$$

که در آن u_τ سرعت اصطکاکی یا برشی بوده که از رابطه (۲۵) محاسبه می‌گردد:

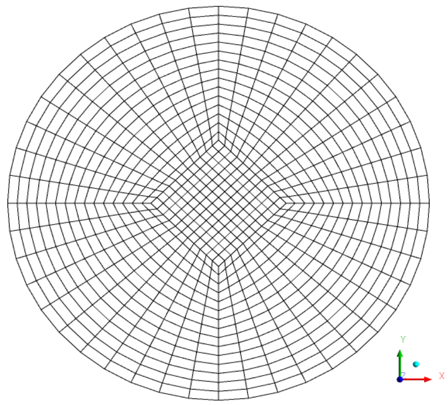
$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{۲۵}$$

برای اطمینان از کیفیت شبکه، مقادیر y^+ در طول دیواره کویل محاسبه شده است. نمودار (۵) مقادیر y^+ میانگین برای هر سطح مقطع در Re=100 آمده است. همانطور از نمودار (۵) مشاهده می‌گردد، در تمامی طول لوله $y^+ > 30$ بوده و بنابراین

شبکه‌بندیاز کیفیت لازم برخوردار است.

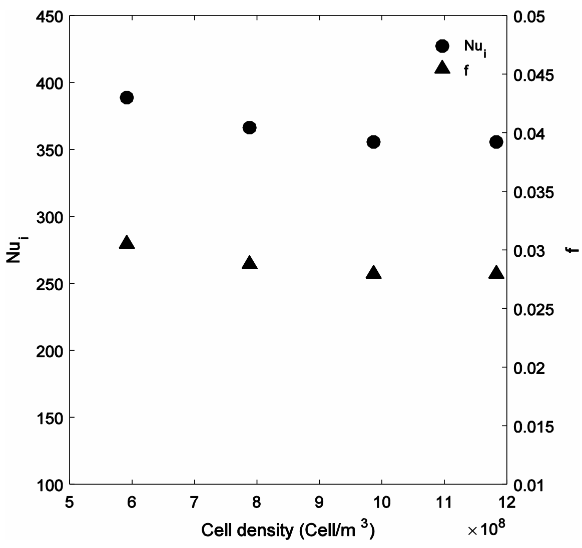


(الف)

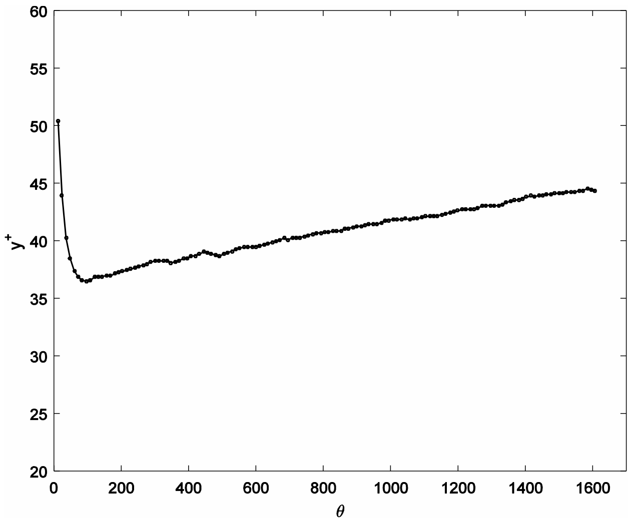


(ب)

شکل ۳ (الف) شبکه‌بندیکویل مارپیچ (ب) شبکه‌بندیسطح مقطع لوله



شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در برابر چگالی شبکه

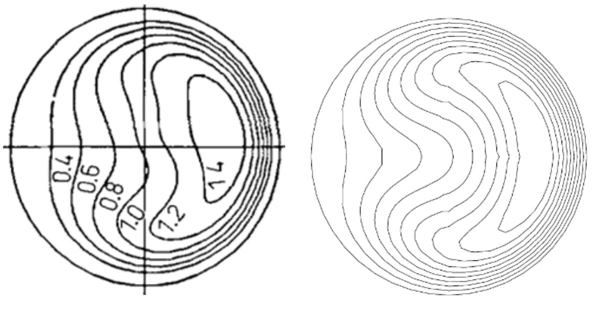


شکل ۵ مقادیر +y میانگین برای هر سطح مقطع در طول کویل مارپیچ (کویل ۱) برای Re=100

نتایج

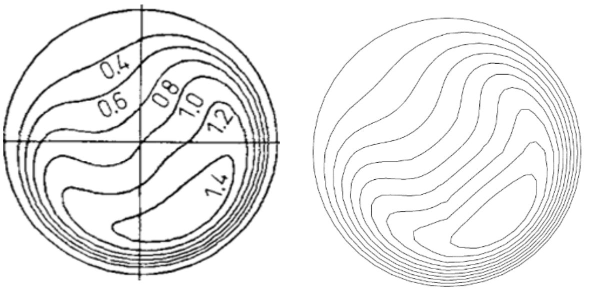
کویل یک، برای بررسی عوامل تأثیر گذار بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در کویل‌های مارپیچ انتخاب می‌گردد. شکل ۵ مقادیر +y میانگین برای هر سطح مقطع در طول کویل مارپیچ (کویل ۱) برای Re=100 را نشان می‌دهد. نیروی گرانش در راستای عمودی (محور y) اعمال و چگالی سیال با تقریب بوزینسک در نظر گرفته شده که بصورت خطی با دما تغییر می‌کند. اثر شاخص توانی سیال‌های غیرنیوتنی مدل توانی بر انتقال حرارت، توزیع دما و جریان‌های ثانویه بررسی شد. سپس تأثیر نیروهای شناوری (عدد گراشف) بر جابه‌جایی ترکیبی در سیال‌های غیرنیوتنی مورد مطالعه و در نهایت تأثیر گام بی‌بعد کویل مارپیچ و غلظت حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفت. معیار تشخیص جابه‌جایی آزاد، اجباری و ترکیبی عدد ریچاردسون است. برای $Ri >> 1$ جابه‌جایی اجباری ناچیز و انتقال حرارت از نوع جابه‌جایی طبیعی، برای $Ri << 1$ جابه‌جایی طبیعی ناچیز و انتقال حرارت از نوع جابه‌جایی اجباری و برای $Ri \approx 1$ انتقال حرارت ترکیبی از جابه‌جایی اجباری و طبیعی (جابه‌جایی ترکیبی) می‌باشد [24]. برای اعتبار سنجی نتایج کار حاضر با مرجع [18] به مقایسه توزیع دما برای جابه‌جایی ترکیبی سیال نیوتنی با وجود نیروی شناوری و در غیاب آن در شکل‌های (۶) و (۷) پرداخته شد. در غیاب نیروهای شناوری (Gr=0)، معادلات سرعت مستقل از معادله انرژی می‌تواند حل شود، بنابراین الگوی

جریان مستقل از عدد پرانتل تحت تأثیر نیروهای مرکز گرا و جریان اجباری است. برای بررسی تأثیر شاخص توانی سیالات غیرنیوتنی بر انتقال حرارت در یک عدد رینولدز، پرانتل و ریچادرسون یکسان، تأثیر این شاخص بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی سیالات غیرنیوتنی نیز بررسی گردید. برای Pr=۱۰ و $Gr=۱۰^{۵}$، توزیع دما نسبت به Pr=۱ تغییر و دو ناحیه دما پایین در بالا و پایین دامنه جریان شکل گرفته است. تراکم خطوط دما ثابت در دیواره افزایش یافته که منجر به افزایش گرادیان دما و عدد ناسلت می‌گردد.



(ب) (الف)

شکل ۶ (الف) توزیع دمای کار حاضر، (ب) توزیع دمای مرجع [18] برای جابه‌جایی اجباری یک سیال نیوتنی (Pr=۱، Gr=۰ و Ri=۰) در کویل ۱

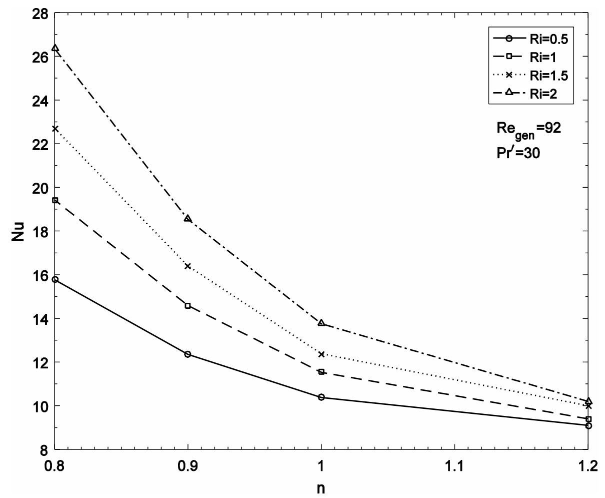


(ب) (الف)

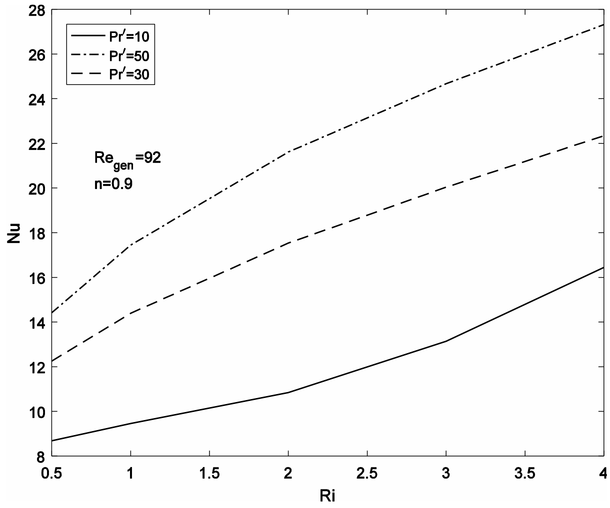
شکل ۷ (الف) توزیع دمای کار حاضر، (ب) توزیع دمای مرجع [18] جابه‌جایی ترکیبی سیال نیوتنی (Pr=۱، $Gr=۱۰^{۵}$ و Ri=۱)در کویل ۱

در شکل (۸)، با افزایش شاخص توانی، ویسکوزیته ظاهری افزایش یافته و این امر منجر به کاهش تصادم بین مولکولی بین مولکولهای نزدیک به دیواره داغ و مولکول‌های دورتر شده و مقاومت در مقابل حرکت در سیال بیشتر شده که این امر منجر به کاهش تبادل انرژی گرمایی و کاهش عدد ناسلت می‌شود. تغییرات عدد ناسلت در مقابل شاخص توانی در اعداد ریچاردسون مختلف برای $Re_{gen}=92$ و عدد پرانتل تعمیم یافته Pr'=30 نشان داده شده است. در حضور نیروهای شناوری، در عدد ریچاردسون برابر، کاهش شاخص توانی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده است. همچنین، شاخص پایداری با افزایش عدد ریچارسون، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده که برای شاخص‌های توانی کوچکتر، این افزایش انتقال حرارت بیشتر است. به طور مشخص، برای n=۱، با تغییر عدد ریچادرسون از ۰/۵ به ۲، عدد ناسلت ۳۲٪ افزایش یافته که این مقدار برای n=۰/۸، برابر ۶۷٪ است. در عدد رینولدز ثابت، افزایش عدد ریچاردسون، عدد گراشف را افزایش داده که سبب افزایش نیروهای شناوری می‌شود. در شکل (۹)، با افزایش عدد ریچاردسون نقش جابه‌جایی آزاد نسبت به جابه‌جایی اجباری بیشتر است. در این حالت ویسکوزیته ظاهری کمتر بوده لذا سیال مقاومت در برابر حرکت کمتری داشته و تصادم مولکولی بیشتر است. این تصادم بیشتر (به علت عدد ریچاردسون بالا) باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد. مقادیر عدد ناسلت میانگین در مقابل عدد ریچادرسون برای جابه‌جایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک با شاخص توانی n=۰/۹ در یک کویل مارپیچ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۹) مشخص است، افزایش عدد پرانتل و عدد ریچاردسون باعث افزایش انتقال حرارت در کویل‌های مارپیچ می‌شود. بنابراین حضور نیروهای شناوری، انتقال حرارت در کویل‌های مارپیچ را با وجود سیال غیرنیوتنی افزایش می‌دهند. در اعداد پرانتل کوچکتر نقش ویسکوزیته ظاهری در مقابل ضرب پخش حرارتی پر رنگ است. از آنجایی که لزجت سینماتیکی متاثر از شاخص پایداری سیال غیر نیوتی بوده اثرات آن بر اعداد ریچاردسون بزرگتر از یک (به واسطه جابه‌جایی طبیعی مؤثرتر) متفاوت می باشد، لذا شیب منحنی عدد ناسلت در اعداد ریچاردسون بزرگتر از یک برای اعداد پرانتل تعمیم یافته بزرگتر از ده تغییر می‌یابد.

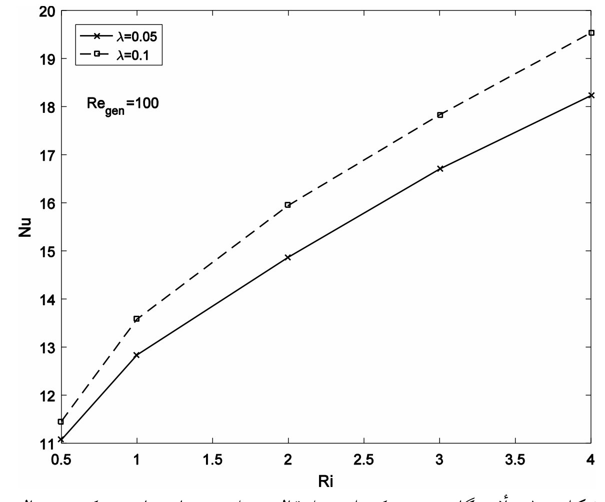
در شکل (۱۰)، با افزایش گام، زاویه بین لوله ها افزایش یافته که منجر به افزایش نیروی گریز از مرکز در سیال می‌گردد. مقدار عدد ناسلت میانگین در مقابل عدد ریچاردسون برای جریان سیال غیرنیوتنی CMC(0.1%) در دو کویل مقایسه شده است. در اعداد ریچاردسون پایینتر که نیروهای گریز از مرکز غلبه بیشتری بر نیروهای شناوری دارند، مقادیر ناسلت برای هر دو کویل تفاوت ناچیزی داشته ولی با افزایش اعداد ریچاردسون، تأثیر گام کویل بر انتقال حرارت افزایش می‌یابد، به‌طوریکه در Ri=4، کویل با λ=۰/۱ نسبت به کویل با λ=۰/۰۵، ۷٪ عدد ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد.



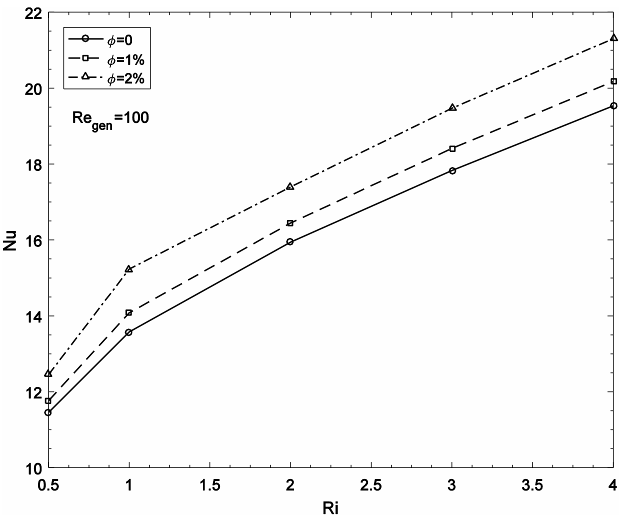
شکل ۸ تغییرات عدد ناسلت بر حسب شاخص توانی برای جابه‌جایی ترکیبی سیالات غیرنیوتنی در کویل ۱ در اعداد ریچاردسون مختلف



شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت در مقابل عدد ریچاردسون برای اعداد پرانتل تعمیم یافته مختلف در جابه‌جایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی در کویل ۱



شکل ۱۰ تأثیر گام بی‌بعد کویل بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی CMC(0.1%) در اعداد ریچاردسون مختلف



شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت میانگین در مقابل رینولدز برای جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال غیرنیوتنی CMC(0.1%)/Al2O3 در کویل ۱ با درصد حجمی نانوذرات ۰٪ تا ۲٪

شکل (۱۱) تأثیر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به سیال غیرنیوتنی CMC(0.1%) بر عدد ناسلت جابه‌جایی ترکیبی در کویل ۱ در اعداد ریچاردسون مختلف به ازای یک عدد رینولدز ثابت را نشان می‌دهد. افزودن نانوذرات سبب افزایش ضریب رسانش سیال پایه و نهایتا افزایش ضریب انتقال حرارت شده، به طوریکه در Ri=۴ برای غلظت حجمی ٪۲=ϕ، عدد ناسلت تا ٪۹ افزایش پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابجابی ترکیبی جریان آرام نانوسیال غیرنیوتنی بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک مورد بررسی محلول CMC/آب با درصد جرمی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد به عنوان سیال‌های پایه و نانوذره Al2O3 با غلظت حجمی ٪۲–٪۱=ϕ به سیال‌های پایه برای چهار کویل با نسبت انحنای متفاوت (۰/۱–۰/۰۵=δ) می‌باشد. تأثیرات شاخص توانی سیال غیرنیوتنی، اثر غلظت حجمی نانوذرات، نسبت انحنای کویل بر انتقال حرارت و افت فشار در جریان آرام نانوسیال غیرنیوتنی بررسی و روابطی برای پیش بینی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه گردید. در بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی جریان آرام، با انتخاب یک کویل با نسبت انحنای ۰/۱، تأثیر شاخص توانی سیال‌های غیرنیوتنی بر عدد ناسلت در عدد رینولدز و ریچاردسون مشخص، بررسی گردید.

اثر پارامترهای گام بی‌بعد کویل و درصد حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر عدد ناسلت میانگین جریان نانوسیال غیرنیوتنی به سیال پایه CMC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی حاصل از تحلیل‌های جریان جابه‌جایی ترکیبی آرام نانوسیال غیرنیوتنی عبارتست از:

۱. در جابه‌جایی ترکیبی در کویل‌های مارپیچ، شدت و الگوی جریان‌های ثانویه علاوه بر نیروی مرکزگرا، تحت تأثیر نیروهای شناوری نیز قرار می‌گیرد. این امر موجب افزایش نرخ انتقال گرما در کویل‌های مارپیچ نسبت به کویل‌های مستقیم می‌گردد.

۲. در جابه‌جایی ترکیبی علاوه بر نیروهای جابه‌جایی، نیروهای شناوری به طور مؤثر بر الگوی توزیع دمای سرعت جریان در کویل‌های مارپیچ تأثیر گذاشته و با افزایش نیروهای شناوری، توزیع دما و سرعت جریان به شکل یکنواخت در آمده و نرخ انتقال گرما را به طور پیوسته افزایش می‌دهد. با افزایش عدد ریچاردسون نقش جابه‌جایی آزاد نسبت به جابه‌جایی اجباری بیشتر است. در این حالت ویسکوزیته ظاهری کمتر بوده لذا سیال مقاومت در برابر حرکت کمتری داشته و تصادم مولکولی بیشتر است. این تصادم بیشتر (به علت عدد ریچاردسون بالا) باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد.

۳. شاخص توانی سیال غیرنیوتنی تأثیر بسزایی در میزان ضریب انتقال حرارت جریان دارد. در یک عدد رینولدز و ریچاردسون یکسان، کاهش شاخص توانی باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد. با افزایش شاخص توانی، ویسکوزیته ظاهری افزایش یافته و این امر منجر به کاهش تصادم بین مولکولی بین مولکولهای نزدیک به دیواره داغ و مولکول‌های دورتر شده و مقاومت در مقابل حرکت در سیال بیشتر شده که این امر منجر به کاهش تبادل انرژی گرمایی و کاهش عدد ناسلت می‌شود. همچنین با تغییر شاخص توانی سیال غیرنیوتنی، الگوی توزیع دما، سرعت و جریان ثانویه تغییر می‌کند. به طوریکه در جریان نانوسیال غیرنیوتنی با شاخص توانی کوچکتر، جریان‌های ثانویه ناشی از نیروهای مرکز گرا از بین رفته و خطوط دما ثابت نزدیک دیواره متراکم شده و گرادیان دمای بالاتری را ایجاد و در نتیجه نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۴. با توجه به نتایج مستخرج از حل عددی مشاهده می‌شود که با افزایش نیروهای شناوری و عدد پرانتل در جابه‌جایی ترکیبی، ضریب انتقال حرارت به طور محسوس افزایش می‌یابد و این امر به این دلیل است که ذرات جامد می‌توانند در جابه‌جایی ترکیبی نقش مؤثرتری در انتقال گرما داشته باشند.

۵. افزایش گام بی‌بعد کویل و غلظت حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده به طوریکه با تغییر گام بی‌بعد کویل از ۰/۰۵ به ۰/۱، عدد ناسلت میانگین به علت تغییرات عدد دین جریان با افزایش گام بی‌بعد کویل ۷٪ افزایش پیدا می‌کند. در واقع نیروی گریز از مرکز سیال در کویل با گام های بزرگتر بیشتر شده که خود باعث تلاطم بیشتر جریان و در نتیجه نرخ انتقال گرمای بیشتر می شود.

فهرست علائم

مساحت (m^2)	A
ظرفیت گرمایی ویژه $(J/Kg.K)$	C_p
قطر لوله (m)	d
قطر کویل (m)	D
قطر (m)	D_h
ضریب اصطکاک	f
شتاب گرانش $(\frac{m}{s^2})$	g
گام کویل مارپیچ (m)	H
ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)	h
رسانندگی گرمایی $(W/m.K)$	K
انرژی جنبشی آشفته $(\frac{m^2}{s^2})$	k
شاخص پایداری پاورلا $(\frac{kg}{s^{2-n}m})$	K'
طول کویل(m)	L
عدد بی‌بعد	M
تعداد دور	N
شاخص رفتار پاورلا	n
فشار(Pa)	P
شار حرارتی (W/m^2)	q''
شعاع لوله (m)	r
شعاع کویل (m)	R
دما (K)	T
سرعت $(\frac{m}{s})$	u
فاصله بی‌بعد از دیوار$(\frac{yu_\tau}{\nu})$	y^+

اعداد بی‌بعد

عدد دین $(Re\,\delta^{0.5})$	Dn
عدد دین تغییر یافته $(Re_{gen}\,\delta^{0.5})$	Dn’
عدد گراشف $(\frac{Re}{Pr})$	Gr
عدد ناسلت (hd/K)	Nu
عدد پرانتل $\frac{Cp\mu}{K}$	Pr
عدد پرانتل تغییر یافته $\frac{CpK'(\frac{8u}{d})^{n-1}}{K}$	Pr’
عدد رایلی $\frac{g\beta\Delta Td^3}{\alpha\nu}$	Ra
عدد رینولدز $(\frac{\rho ud}{\mu})$	Re
عدد ریچاردسون $\frac{Gr}{Re}$	Ri

علائم یونانی

نرخ کرنش $1/s$	γ
ویسکوزیته دینامیکی $\frac{Ns}{m^2}$	μ
نرخ اتلاف آشفتگی $\frac{m^2}{s^3}$	ε
ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{K}$	β
چگالی $\frac{Kg}{m^3}$	ρ
تنش برشی Pa	τ
ویسکوزیته سینماتیکی $\frac{m^2}{s}$	ν
ضریب نفوذ حرارتی $\frac{m^2}{s}$	α
گام بی‌بعد کویل $\frac{H}{2\pi Rc}$	λ
نسبت انحنای کویل $\frac{r}{Rc}$	δ
شاخص عملکرد ترمو-هیدرودینامیکی	η
زاویه محوری کویل نسبت به ورودی	θ
غلظت حجمی نانوذرات (٪)	ϕ

زیرنویس ها

بالک	b
کویل	c
بحرانی	cr
سیال	f
تعمیم یافته	gen
میانگین	m
نانوسیال	nf
نانوذره	np
آشفته	t
روی دیوار	w
اندیس محورهای مختصات فضایی	i,j,k

واژه نامه

نانو سیال	Nano fluids
سیال غیرنیوتنی	Non-Newtonian heat
لوله مارپیچ قائم	Exchangers helical coils
جابه‌جایی ترکیبی	Mix convection
تحلیل عددی	Numerical study

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] R. Selbas, Ö. Kızılkan, and M. Reppich, “A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 45, no. 4, pp. 268–275, 2006. https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.07.004

[2] G. Huminic and A. Huminic, “Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 4280–4287, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.05.017

[3] K. Javaherdeh and H. Karimi, “Numerical analysis of the obstacle effect with different geometry on the heat transfer of nanofluid flow in a rectangular channel,” *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 3, pp. 51–64, 2023.

[4] M. Naghian and Kh. Hosseini, “Using Collocation Discrete Least Squares Meshless method in solving governing

equations for non-Newtonian fluids by Herschel–Bulkley model," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 2, pp. 247–259, 2021. https://doi.org/10.22044/jsfm.2021.2183

[5] H. Karimi, H. A. Danesh Ashtiani, and C. Aghanajafi, "Study of mixed materials heat exchanger using optimization techniques," *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 414–433, 2019. https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2018-0142

[6] H. Karimi, H. Ahmadi-Danesh, and C. Aghanajafi, "Applying multiple decomposition methods and optimization techniques for achieving optimal cost in mixed materials heat exchanger networks," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 3711–3722, 2019. https://doi.org/10.1002/er.4526

[7] H. Karimi, H. A. Danesh Ashtiani, and C. Aghanajafi, "Optimization of the total annual cost in a shell and tube heat exchanger by Ant colony optimization technique," *Iranian Journal of Marine Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 113–121, 2019.

[8] S. Ghanbari and K. Javaherdeh, "Thermal performance enhancement in perforated baffled annuli by nanoporous graphene non-Newtonian nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, vol. 167, p. 114719, 2020. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114719

[9] S. Mozafarie and K. Javaherdeh, "Numerical design and heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flow for annulus with helical fins," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.03.001

[10] E. Taheran and K. Javaherdeh, "Experimental investigation on the effect of inlet swirl generator on heat transfer and pressure drop of non-Newtonian nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 551–561, 2019. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.034

[11] M. Nemati, M. Sefid, and A. R. Rahmati, "The effect of changing the position of the hot wall and increasing the amplitude and number of oscillations of wavy wall on the flow and heat transfer of nanofluid inside the channel in the presence of magnetic field," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 10, no. 2, pp. 219–236, 2020. https://doi.org/10.22044/jsfm.2020.8917.3022

[12] K. Javaherdeh and H. Karimi, "Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al_2O_3 nanoparticle in a channel with block," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 93–110, 2023. https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.40042

[13] E. Hosseinirad, V. Bidarian, F. Hormozi, and M. Khoshvaght-Aliabadi, "Modelling and optimization of geometrical parameters in design of the wavy-fin-plate compact heat exchanger by Taguchi method," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 3, pp. 89–101, 2022. https://doi.org/10.22044/jsfm.2022.8850.3003

[14] H. Pakdaman, M. Alizadeh, and V. Kalantar, "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger with Chevron plates," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 25, no. 1, pp. 47–60, 2014.

[15] H. Eskandari and I. Hashemi, "Numerical comparison of shell side thermo-hydraulic characteristics of shell and tube heat exchangers with trefoil and segmental baffle by genetic algorithm," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 55–76, 2023.

[16] M. Kahani, S. Z. Heris, and S. M. Mousavi, "Effects of curvature ratio and coil pitch spacing on heat transfer performance of Al_2O_3/water nanofluid laminar flow through helical coils," *Journal of Dispersion Science and*

Technology, vol. 34, pp. 1704–1712, 2013. https://doi.org/10.1080/01932691.2013.764485

[17] M. Rakhsha, F. Akbaridoust, A. Abbassi, and S.-A. Majid, "Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 178–189, 2015. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.019

[18] G. Yang and M. Ebadian, "Mixed convective flow and heat transfer in a vertical helicoidal pipe with finite pitch," *Computational Mechanics*, vol. 14, pp. 503–512, 1994. https://doi.org/10.1007/BF00377602

[19] S. S. Pawar and V. K. Sunnapwar, "Experimental and CFD investigation of convective heat transfer in helically coiled tube heat exchanger," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 11, pp. 2294–2312, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.016

[20] S. S. Pawar and V. K. Sunnapwar, "Experimental studies on heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in helical coils with laminar and turbulent flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 792–804, 2013. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.09.024

[21] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, and D. D. Ganji, "Experimental study on turbulent flow and heat transfer in an air to water heat exchanger using perforated circular-ring," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 70, pp. 185–195, 2016. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.09.013

[22] Y. Lin, L. Zheng, and X. Zhang, "Radiation effects on Marangoni convection flow and heat transfer in pseudo-plastic non-Newtonian nanofluids with variable thermal conductivity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 77, pp. 708–716, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.028

[23] J. Tian, Z. He, T. Xu, X. Fang, and Z. Zhang, "Rheological property and thermal conductivity of multi-walled carbon nano-tubes-dispersed non-Newtonian nano-fluids based on an aqueous solution of carboxymethyl cellulose," *Experimental Heat Transfer*, vol. 29, no. 3, pp. 378–391, 2016. https://doi.org/10.1080/08916152.2014.1001919

[24] M. H. Matin and W. A. Khan, "Laminar natural convection of non-Newtonian power-law fluids between concentric circular cylinders," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 112–121, 2013. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.02.006

[25] K. Javaherdeh, H. Karimi, and A. Khojasteh, "Numerical study of heat transfer enhancement of non-Newtonian nanofluid in porous blocks in a channel partially," *Powder Technology*, vol. 383, pp. 270–279, 2021. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.033